مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۴۰۰)
دوره‌ی ۱-۳۷، شماره‌ی ۱، ص. ۵۹-۶۹، (پژوهشی)

Original Article

زمان‌بندی نگهداری و تعویض پیش‌گیرانه‌ی چند حالته برای سیستم‌های چندجزئی با لحاظ کردن توقفات غیرخرابی

جلال تاجی (کارشناس ارشد)
هیوا فاروقی * (دانشیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

در دنیای واقعی، تنها عامل توقف دستگاه، خرابی و یا بازرسی دوره‌یی نیست و توقفات غیرخرابی از جمله: نوع و پیوستگی کار مانند طی کردن چرخه‌ی کوره (فرایند مهندسی)، تولید نمونه‌های اولیه و آزمون، تخلیه‌ی نهایی، انجام پروژه‌ها، اصلاحات و نظایر این‌ها باعث توقف ماشین می‌شوند و فرصت مناسبی را فراهم می‌آورند تا بعضی از فعالیت‌های نگهداری در این زمان‌ها انجام شود و از توقف آتی سیستم جهت بازرسی دوره‌یی جلوگیری شود؛ که این خود باعث افزایش دسترسی به سیستم و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. با این نگرش جدید، در این نوشتار با در نظر گرفتن مدت زمان انجام فعالیت‌ها و هزینه‌ی توقف متغیر وابسته به زمان به‌عنوان نوآوری‌های دیگر، یک مدل ریاضی برای تعیین زمان‌بندی نگهداری و تعویض پیشگیرانه‌ی بهینه ارائه شده است. به عنوان روش حل، الگوریتم فرا‌ابتکاری ژنتیک پیاده‌سازی و در انتها با حل یک مثال عددی تأثیر توقفات غیرخرابی در کاهش ملموس هزینه‌ها نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: زمان‌بندی، نگهداری و تعویض پیشگیرانه، توقفات غیرخرابی، الگوریتم ژنتیک.

j.taji@eng.uok.ac.ir
h.farughi@uok.ac.ir

۱. مقدمه

نگهداری پیشگیرانه معمولاً شامل مجموعه‌یی از فعالیت‌های از قبل تعیین شده نظیر بازرسی دوره‌یی، تمیزکاری، روان‌کاری، تنظیم، تعمیر مؤلفه‌ها و یا تعویض آن‌هاست که از طریق تغییر مشخصه عمرکمک می‌کند تا شرایط سیستم بهبود یابد.[۱] در بسیاری از سیستم‌های تولیدی این‌گونه است که با به‌کارگیریِ تجهیزات و فرسوده شدن آن‌ها، احتمال خرابی در آن‌ها بیشتر می‌شود که این خود منجر به کاهش قابلیت اطمینان و افزایش هزینه‌های عملیاتی[۱] (مانند هزینه‌ی شکست) می‌شود. بنابراین مدیریت نگهداری پیشگیرانه به‌عنوان یک واحد مهم در سیستم‌های تولیدی برای نگه داشتن تجهیزات در یک شرایط مناسب با هدف کاهش خرابی‌ها و کاهش هزینه‌های عملیاتی صورت می‌گیرد.[۲] در واقع نگهداری پیشگیرانه یک تعادل بین هزینه‌های حاصل از فعالیت‌های نگهداری/تعویض پیشگیرانه و سود حاصل از کاهش نرخ خرابی کلی سیستم است و مسئله‌ی اصلی در آن پیدا کردن بهترین توالی فعالیت‌های نگهداری برای هر عنصر در سیستم در هر دوره در کل افق برنامه‌ریزی است تا تابع هدف با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌ها بهینه شود.[۳]

از طرفی با توسعه‌ی فنّاوری‌های پیشرفته‌ی تولید، ماشین‌آلات و تجهیزات مدرن به طور فزاینده‌یی اتوماتیک و هوشمند می‌شوند تا پاسخگوی تغییر بازار و افزایش تنوع محصولات باشند که این خود متعاقباً باعث حفظ تجهیزات در یک سطح مطلوب[۲] از قابلیت اطمینان سخت‌تر از پیش شود و مسئله‌ی شکست ماشین‌آلات[۳] نیز از اهمیت بیشتری برخوردار شود.[۴و۵] بنابراین برای تضمین عملکرد این ماشین‌آلات پیچیده با قابلیت اطمینانی بالا، ایمنی انسان و حفظ محیط زیست، سیاست‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بیش از پیش اهمیت یافته است؛ در این راستا قابلیت اطمینان و قابلیت تعمیرپذیری یک نقش مهم را ایفا می‌کند.[۶]

به طور کلی قابلیت اطمینان سیستم بستگی به عمر سیستم و سیاست‌های نگهداری انجام شده روی آن دارد.[۷] برای سیستم‌های قابل تعمیر، سه نوع نگهداری و تعمیر وجود دارد: تعمیرات جزئی که سیستم را به حالت «بد مثل سابق[۴]» بازمی‌گرداند؛ نگهداری عمده (تعمیرات اساسی[۵] یا تعویض) که سیستم را به حالتی مثل نو برمی‌گرداند؛ و نگهداری بینابینی (یا نگهداری ناقص) که بسته به شرایط، سیستم را به وضعیتی بین «بد مثل سابق» و «جدید» سوق می‌دهد.[۸]

در این نوشتار یک مدل ریاضی برای زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه ارائه می‌شود. افق برنامه‌ریزی به بازه‌های برابر تقسیم می‌شود و در انتهای هر دوره (که ممکن است به‌صورت ساعت، روز، هفته و ... تعریف شود) در رابطه با انجام نوع فعالیت نگهداری (سرویس، تعمیر، تعویض و یا انجام هیچ فعالیتی)

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۲/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۱/۲۸، پذیرش ۱۳۹۹/۱۲/۱۸.
DOI:10.24200/J65.2021.55245.2095

تصمیم‌گیری خواهد شد. مسئله طراحی یک توالی از فعالیت‌های نگهداری برای هر مؤلفه از سیستم برای هر دوره در طی افق برنامه‌ریزی است، به نحوی که هزینه‌ی کلی کمینه و قابلیت اطمینان مورد نظر برآورده شود. نوآوری این نوشتار در نظرگرفتن هزینه‌ی توقف وابسته به مدت زمان توقف و لحاظ کردن توقفات غیرخرابی (توقفاتی که دلیل آنها خرابی نیست و به دلایلی مانند: نوع و پیوستگی کار، آموزش پرسنل، صرف نهار، آماده‌سازی و ... رخ می‌دهند) است که در انتهای بخش ۲ با جزئیات تشریح شده است.

۲. مرور ادبیات

مدل بهینه‌سازی یک مدل ریاضی است که به انتخاب بهترین راه‌حل از بین تمام جواب‌های ممکن اشاره دارد. مدل‌های بهینه‌سازی به‌صورت گسترده توسعه داده شده‌اند و برای یافتن زمان‌بندی بهینه نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این بخش ما مقالات اخیر را که مرتبط با مدل ما هستند، مرور می‌کنیم.

از زمانی که بارلو و هانتر[۹] مدل تعمیر جزئی را در سال ۱۹۶۰ ارائه دادند، تلاش‌های زیادی روی زمان‌بندی نگهداری انجام شده، که نقش مهمی در بهبود ایمنی عملیاتی، کمینه‌سازی هزینه‌ها، کاهش دفعات و شدت خرابی سیستم در حال کار ایفا می‌کنند. این مدل‌ها از معیارهای متفاوتی برای بهینه‌سازی استفاده کرده‌اند. در این بخش تعدادی از مدل‌های معروف مسئله‌به طور مختصر بیان خواهد شد.

به‌صورت گسترده سیاست نگهداری پیشگیرانه که روی یک سیستم در حال فرسودگی دارای یک عنصر تمرکز دارد مورد مطالعه قرار گرفته است.[۱۰-۱۲] اما با توجه به افزایش پیچیدگی و تنوع در سیستم‌های تولیدی به نگهداری پیشگیرانه روی سیستم‌های چندمؤلفه‌یی بیشتر توجه شده است.[۱۳]

مدل‌های نگهداری پیشگیرانه‌ی موجود برای سیستم‌های چندمؤلفه‌یی را می‌توان در دو دسته طبقه‌بندی کرد. در اولین دسته فرض می‌شود که هر عنصر دو حالت دارد، یا درحال کار و یا از کار افتاده است. فرسودگی عناصر در نرخ خرابی تعریف می‌شود با این هدف که بتوان یک استراتژی بهینه برای کمینه‌سازی هزینه‌ی نگهداری پیدا کرد. معمولاً مسئله، بهینه‌سازی آستانه‌ها یا پارامترهای دیگر به‌منظور کمینه‌سازی هزینه است.[۱۴و۱۵] در این زمینه ژو و لی[۱۶] با بهینه‌سازی متوالی هزینه‌ی نگهداری در هر نقطه از نگهداری، یک سیاست نگهداری پیشگیرانه‌ی پویا را ارائه دادند.

دسته‌ی دوم مبتنی بر زنجیره‌ی مارکوف با حالت‌های گسسته است که حالات عناصر به چند دسته مثل «خوب مثل جدید»، «ناشی از نگهداری» و «خراب» تقسیم می‌شود.[۱۷] در این زمینه، نورلفت و آیت کدی[۱۸] مسئله‌ی اولویت‌دهی منابع بین عناصر را تحت محدودیت قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار دادند. شالابی و همکاران[۱۹] یک مدل بهینه‌سازی برای زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه‌ی سیستم چندعنصری با چند حالت توسعه دادند. آن‌ها توالی فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه را به‌عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری تعریف کردند و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بعد از شکست را به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفتند.

سیستم‌های مکانیکی را نیز می‌توان به سیستم قابل تعمیر یا سیستم غیر قابل تعمیر طبقه‌بندی کرد و کیفیت نگهداری را می‌توان به‌عنوان کامل یا ناقص در نظر گرفت. در این زمینه مطالعات مروری جامعی در مورد مدل‌سازی نگهداری و بهینه‌سازی سیستم‌های مکانیکی می‌توان یافت.[۵و۲۰]

در مطالعات تحقیقاتی موجود، چندین مدل نگهداری متوسط ارائه شده است. دینگ و تیان[۲۱] بر این باور بودند که اقدام نگهداری و تعمیرات متوسط می‌تواند نرخ شکست سیستم را به با احتمال p به «خوب مثل جدید» یا با احتمال $p-1$ به «بد مثل سابق» به روز کند. ناکاگاوا،[۲۲و۲۳] لی و چون[۲۴] یک مدل نرخ شکست را ارائه داد، که در آن نگهداری و تعمیرات متوسط برای کاهش نرخ شکست سیستم انجام شده است. کامران مقدم و یوشر[۲۵] یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ی جدید را برای تعیین زمان‌بندی تعویض و نگهداری پیشگیرانه در یک سیستم چندهدفه قابل نگهداری و تعمیر توسعه دادند.

تا آن‌جا که نتیجه‌ی بررسی‌های نویسندگان این نوشتار نشان می‌دهد در تمامی تحقیقاتی که تاکنون در این زمینه انجام شده فرض بر این است که دستگاه تا زمانی که دچار خرابی نشود متوقف نمی‌شود، در صورتی که در دنیای واقعی، تنها عامل توقف دستگاه خرابی آن نیست. به‌عبارت دیگر گاهی دستگاه مشکلی برای ادامه کار ندارد اما توقفات غیرخرابی (توقفاتی که دلیل آنها خرابی نیست) به دلایلی مانند: نوع و پیوستگی کار، آموزش پرسنل، صرف نهار، آماده‌سازی، عدم حضور اپراتور، تولید نمونه‌های اولیه و آزمون، تخلیه‌ی نهایی، انجام پروژه‌ها و اصلاحات (اصلاحی و سرمایه‌یی) مثل رنگ‌آمیزی کارخانه، کف‌بندی مجدد، طی کردن چرخه‌ی کوره (فرایند مهندسی)، پیش‌گرم، خالی کردن باکس اکسید و نظایر این‌ها باعث توقف ماشین می‌شوند و فرصت مناسبی را فراهم می‌آورند تا بعضی از فعالیت‌های نگهداری در این زمان‌ها انجام شوند که باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود. در رابطه با این توقفات می‌توان گفت که انجام کار به این صورت است که سیستم به دلایل غیرخرابی متوقف می‌شود و مدت زمان این توقفات محدود است. مسئله این است که آیا انجام بعضی از فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در این زمان‌ها باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش دسترسی سیستم می‌شود یا خیر؟ در واقع با انجام فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در این زمان‌ها، هزینه‌ی کم‌تری به سبب نداشتن هزینه‌ی توقف سیستم پرداخت می‌شود (به این دلیل که در این زمان‌ها چه فعالیت نگهداری انجام شود و چه نشود ماشین متوقف شده است) و از انجام آن‌ها در نقاط بازرسی و از قبل تعیین شده برای نگهداری جلوگیری می‌شود و مدت زمان دسترسی به سیستم افزایش می‌یابد. در عین حال امکان دارد در نقاطی که توقفات غیرخرابی انجام می‌گیرد قابلیت اطمینان سیستم هنوز به حالت بحرانی نرسیده باشد و نیازی به انجام فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه احساس نشود که با توجه به هزینه‌های توقف سیستم و هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه و خرابی اضطراری باید تصمیم گرفت که تا چه حد فعالیت‌های نگهداری در نقاط دارای توقف غیرخرابی و تا چه حد در سایر دوره‌ها انجام شود. لازم به ذکر است که تفاوت نگرش این نوشتار با نگهداری حریصانه[۶] در این است که نگهداری حریصانه هیچ استفاده‌یی از توقفات غیرخرابی نمی‌کند بلکه صرفاً در نقاط بازرسی از پیش تعیین شده، سایر مؤلفه‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد.

۳. فعالیت‌های نگهداری

در این تحقیق یک مدل برای زمان‌بندی و برنامه‌ریزی فعالیت‌های تعویض و نگهداری یک سیستم تعمیرپذیر چندمؤلفه‌یی ارائه خواهد شد. در هر دوره فرض می‌شود که یکی از فعالیت‌های زیر برای هر مؤلفه بتوانند انجام گردند:

۱.۳. سرویس (MS) [۷]

چند فعالیت عمومی MS عبارت است از: روان‌کاری، تمیزکاری گرد و غبار و زنگارها، محکم‌کردن بخش‌های شل، تنظیم و تزریق مواد مصرفی. این نوع فعالیت‌ها می‌توانند

زیرسیستم را برای یک شرایط بهتر تنظیم کنند و بیشتر بر نگهداری سیستم در شرایط عملیاتی نرمال تأکید دارند و معمولاً ابزار و تکنیک‌های کم‌تری برای انجام آن‌ها مورد نیاز است و مقدار بهبودی که ایجاد می‌کنند محدود است. در این نوع نگهداری از موادی مثل آب و روغن استفاده می‌شود.

۲.۳. تعمیر (MR) [۸]

تعمیر عموماً شامل فعالیت‌های تعویض یا تعمیر چند بخش ساده است که زیرسیستم را بازتوانی می‌کند تا به یک حالت بهتر از MS دست یابد. عمدتاً برای مؤلفه‌هایی استفاده می‌شود که تهیه و خرید آن‌ها آسان نیست؛ شامل تعمیر و تعویض چند بخش ساده مثل: فنر، مهره، تسمه، پیاده‌سازی کامل موتور برای تعمیر، تقویت ساختار مهندسی، دمونتاژ، مونتاژ مجدد مؤلفه‌های تعمیر شده است. انجام این نوع فعالیت روی مؤلفه، آن را به حالتی بین «خوب مثل اول» و «بد مثل سابق» می‌برد.

۳.۳. تعویض (RP) [۹]

این نوع فعالیت همان تعویض یک زیرسیستم فرسوده با یک زیرسیستم نو است که از یک خرابی و مشکل جدی جلوگیری می‌کند. این فعالیت برای مؤلفه‌های کلیدی انجام می‌گیرد تا از خسارات جدی جلوگیری شود. به علاوه مؤلفه‌هایی که چندین بار سایر فعالیت‌های نگهداری روی آن‌ها انجام گرفته است و قابل استفاده نیست ممکن است این نوع فعالیت روی آن‌ها انجام گیرد.

۴. ساختار سیستم

فرض بر آن است که یک سیستم نو تعمیرپذیر و قابل نگهداری با ساختار سری با N مؤلفه وجود دارد. همچنین فرض می‌شود هر مؤلفه در سیستم با توجه به رفتار در حال افت آن دارای یک نرخ افزایشی رخداد شکست با تابع $v_i(t)$ است که t اشاره به زمان دارد ($t > 0$). در این نوشتار شکست هر مؤلفه از فرایند پوآسون غیرهمگن پیروی می‌کند و طبق رابطه‌ی ۱ بیان می‌شود:

$$v_i(t) = \lambda_i.\beta_i.t^{\beta_i - 1} for \quad i = 1, \ldots, N \qquad (1)$$

که در آن λ_i و β_i پارامترهای شکل و مقیاس مؤلفه‌ی iام هستند.

۵. مدل ریاضی مسئله

در این بخش یک رویکرد جدید مدل‌سازی به منظور یافتن زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نگهداری و تعویض پیشگیرانه برای یک سیستم چندمؤلفه‌یی پیشنهاد می‌شود.

- **اندیس‌ها**

i: شمارنده‌ی مؤلفه (زیرسیستم)؛
j: شمارنده‌ی اجراء تولید (دوره).

- **پارامترهای مسئله**

MS_i: هزینه‌ی انجام فعالیت سرویس نگهداری روی مؤلفه‌ی iام؛
MR_i: هزینه‌ی انجام فعالیت نگهداری تعمیر روی مؤلفه‌ی iام؛
RP_i: هزینه‌ی تعویض مؤلفه‌ی iام؛
TMS_i: مدت زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت سرویس نگهداری روی مؤلفه‌ی iام؛
TMR_i: مدت زمان مورد نیاز برای انجام فعالیت تعمیر روی مؤلفه‌ی iام؛
TR_i: مدت زمان مورد نیاز برای تعویض مؤلفه‌ی iام؛
B: تعداد کل دوره‌های تولید در طی افق برنامه‌ریزی؛
K: تعداد دوره‌ها تا قبل از توقف غیرخرابی؛
λ_i: پارامتر مقیاس مؤلفه‌ی iام؛
β_i: پارامتر شکل مؤلفه‌ی iام؛
Δt: مدت زمان کارکردن سیستم بین دو دوره؛
$m_{i,1}$: فاکتور توسعه‌ی فعالیت سرویس نگهداری برای مؤلفه‌ی iام در همه‌ی دوره‌ها؛
$m_{i,2}$: فاکتور توسعه برای فعالیت تعمیر برای مؤلفه‌ی iام در همه‌ی دوره‌ها؛
N: تعداد کل مؤلفه‌های سیستم؛
h_{DC}: هزینه‌ی متغیر توقف سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه به‌ازای هر واحد زمان؛
h_{FC}: هزینه‌ی ثابت توقف سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه؛
X_j: مدت زمان توقف غیر خرابی در دوره jام؛
C_b: هزینه‌ی توقف سیستم برای انجام نگهداری اصلاحی به‌ازای هر واحد زمان؛
$t_{b,m}$: متوسط زمان اجرای نگهداری اصلاحی به‌ازای هربار توقف ناگهانی سیستم؛
C_f: هزینه‌ی امکان شکست ناگهانی؛
R_{req}: حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز.

- **متغیرهای مسئله**

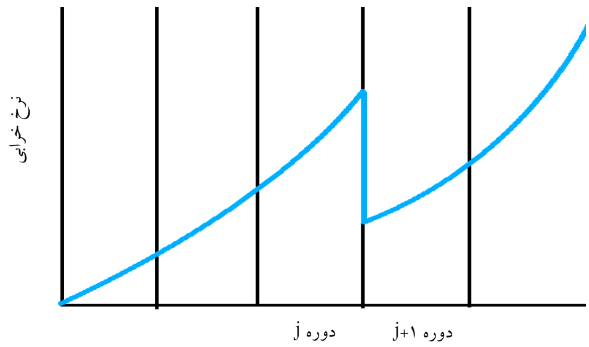
$ms_{i,j}$: متغیر صفر و یک. اگر در دوره شماره jام روی مؤلفه‌ی i فعالیت سرویس نگهداری انجام شود مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود (متغیر تصمیم‌گیری)؛
$mr_{i,j}$: متغیر صفر و ۱. اگر در دوره شماره jام روی مؤلفه‌ی i فعالیت تعمیر انجام شود مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود (متغیر تصمیم‌گیری)؛
$r_{i,j}$: متغیر صفر و ۱. اگر در دوره شماره jام مؤلفه‌ی i تعویض شود مقدار ۱ و در غیر این صورت صفر می‌شود (متغیر تصمیم‌گیری)؛
$X_{i,j}$: عمر مؤثر مؤلفه‌ی iام در ابتدای دوره شماره jام؛
$X'_{i,j}$: عمر مؤثر مؤلفه iام در انتهای دوره شماره jام.

زمان‌بندی فعالیت‌های آتی نگهداری و تعویض یک سیستم در طول افق برنامه‌ریزی انجام می‌شود. در پایان هر دوره هر مؤلفه سرویس مکانیکی، تعمیر و یا تعویض خواهد شد و یا هیچ فعالیتی روی آن انجام نمی‌شود. در این پژوهش فرض بر این است که هر یک از سه فعالیت مذکور باعث کاهش سن مؤثر سیستم شده و متعاقباً سبب کاهش نرخ رخداد شکست آن خواهند شد. به منظور تغییرات در عمر و نرخ شکست سیستم، سن ابتدایی هر مؤلفه‌در آغاز دوره‌ی برنامه‌ریزی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

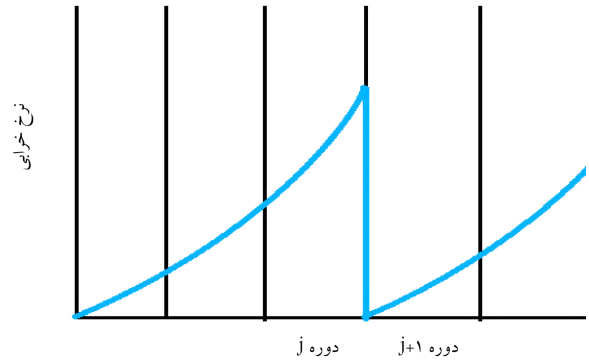
$$X_{i,1} = 0 \qquad (2)$$

۱.۵. تأثیر فعالیت‌های نگهداری

در شکل ۱ تأثیر تعویض و در شکل ۲ تأثیر نگهداری روی نرخ خرابی زیرسیستم/سیستم نشان داده شده است. معمولاً فعالیت‌های نگهداری، مؤلفه را به یک حالت «بهتر از گذشته» و «بدتر از جدید» برمی‌گرداند. عمر مؤثر x برای محاسبه‌ی یک تغییر سریع به جای عمر تقویمی t به کار گرفته می‌شود. سپس قابلیت اطمینان به‌وسیله‌ی $R(x)$ بجای $R(t)$ ارزیابی می‌شود. X_{ij} و X'_{ij} به‌عنوان عمرهای مؤثر زیرسیستم iام در



شکل ۱. تأثیر نگهداری و سرویس در انتهای دوره j روی نرخ خرابی مؤلفه.



شکل ۲. تأثیر تعویض در انتهای دوره j روی نرخ خرابی مؤلفه.

شروع و پایان jام در نظرگرفته می‌شود؛ Δt نیز مدت زمان بین دو دوره‌ی متوالی است:

$$X'_{i,j} = X_{i,j} + \Delta t \;\; ; i = ۱, ۲, \ldots, N \;\; ; j = ۱, ۲, \ldots, B \qquad (۳)$$

اگر نگهداری پیشگیرانه به کارگرفته شود، فرض می‌شود که عمر مؤثر به‌صورت آنی کاهش یابد. تغییرات در روابط ۴ و ۵ مدل شده‌اند؛

$$\begin{aligned} &MS : X_{i,j+۱} = X_{i,j} + \alpha_{i,j}\Delta t = X'_{i,j} - (۱ - \alpha_{i,j})\,\Delta t \\ &for i = ۱, ۲, \ldots, N; j = ۱, ۲, \ldots, B-۱, ۰ \le \alpha_{i,j} \le ۱ \end{aligned} \qquad (۴)$$

$$\begin{aligned} &MR : X_{i,j+۱} = \alpha_{i,j} X'_{i,j} \\ &for i = ۱, ۲, \ldots, N \;\; ; j = ۱, ۲, \ldots, B-۱ \;\; , ۰ \le \alpha_{i,j} \le ۱ \end{aligned} \qquad (۵)$$

$\alpha_{i,j}$ یک فاکتور توسعه است و به تأثیر فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه بستگی دارد. زیرسیستم‌ها بعد از انجام فعالیت نگهداری پیشگیرانه جوان‌تر می‌شوند. فرض شده است که تأثیر MS و MR برای هر زیرسیستم ثابت باشد و در همه‌ی دوره‌ها فاکتور توسعه برابر $m_{i,۱}$ و برای همه فعالیت‌های MS در همه دوره‌ها برابر $m_{i,۲}$ می‌باشد که طبق رابطه ۶ داریم:

$$\alpha_{i,j} = \left\{ \begin{array}{ll} m_{i,۱} & For\ MS\ j = ۱, ۲, \ldots, B-۱ \quad i = ۱, ۲, \ldots, N \\ m_{i,۲} & For\ MR\ j = ۱, ۲, \ldots, B-۱ \quad i = ۱, ۲, \ldots, N \end{array} \right\} \qquad (۶)$$

اگر زیرسیستم i تعویض شده باشد (در پایان دوره‌ی j ام) داریم:

$$X_{i,j+۱} = ۰ \;\; ; i = ۱, ۲, \ldots, N \;\; ; j = ۱, ۲, \ldots, B-۱ \qquad (۷)$$

برای موردی که هیچ فعالیتی انجام نشده، هیچ تغییری روی عمر مؤثر انجام نمی‌شود:

$$X_{i,j+۱} = X'_{i,j} \;\; ; i = ۱, ۲, \ldots, N \;\; ; j = ۱, ۲, \ldots, B-۱ \qquad (۸)$$

متغیرهای صفر و ۱ MS_{ij}، MR_{ij} و r_{ij} به این صورت تعریف می‌شوند که اگر در دوره‌ی j روی مؤلفه‌ی i به‌ترتیب فعالیت MS، MR و R انجام شود برابر ۱ و در غیر این‌صورت برابر صفر خواهد شد. معادلات بالا را می‌توان در یک فرم یک‌پارچه مطابق روابط ۹ تا ۱۵ نوشت:

$$\begin{aligned} X_{i,j} &= (۱ - ms_{i,j-۱})(۱ - mr_{i,j-۱})(۱ - r_{i,j-۱})\, X'_{i,j-۱} \\ &+ ms_{i,j-۱}\left[X'_{i,j-۱} - (۱ - m_{i,۱})\,\Delta t\right] + mr_{i,j-۱}\left(m_{i,۲} X'_{i,j-۱}\right) \end{aligned} \qquad (۹)$$

$$ms_{i,j} + mr_{i,j} + r_{i,j} \le ۱ \qquad (۱۰)$$

$$X'_{i,j} = X_{i,j} + \Delta t \qquad (۱۱)$$

$$X_{i,۱} = ۰, X'_{i,۱} = \Delta t \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{j=۱}^{B}\sum_{i=۱}^{N}\left(MS_i.ms_{i,j} + MR_i.mr_{i,j} + R_i.r_{i,j}\right) \qquad (۱۳)$$

$$ms_{i,j}, mr_{i,j}, r_{i,j} = ۰ or ۱ \qquad (۱۴)$$

$$ms_{i,j} + mr_{i,j} + r_{i,j} \le ۱ \qquad (۱۵)$$

۲.۵. هزینه‌های نگهداری پیشگیرانه

هزینه‌های نگهداری و تعویض بخش مهمی از کل هزینه‌های عملیاتی را در صنایع تولید شامل می‌شوند. با توجه به نوع صنایع، هزینه‌های نگهداری و تعویض را می‌توان بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ هزینه‌های تولید بیان کرد.[۲۶] انواع هزینه‌ها عبارتند از:

۱.۲.۵. هزینه‌ی اجرایی نگهداری پیشگیرانه

این هزینه‌ها شامل هزینه‌ی مستقیم انجام هر یک از فعالیت‌های سرویس، تعمیر و تعویض در انتهای هر دوره در طول افق برنامه‌ریزی است.

۲.۲.۵. کل هزینه‌ی توقف سیستم به علت اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه

با در نظرگرفتن هزینه‌های شکست، سرویس، تعمیر و تعویض یک سیستم چندمؤلفه‌یی، مسئله‌ی مورد نظر را می‌توان به یک مسئله‌ی ساده برای یافتن ترتیب بهینه از فعالیت‌های سرویس، تعمیر، تعویض و یا عدم انجام فعالیت و مستقل از دیگر مؤلفه‌ها تبدیل کرد. بنابراین مسئله‌شامل تعیین بهترین ترتیب برای هر مؤلفه‌بدون توجه به فعالیت‌های درنظرگرفته شده برای سایر مؤلفه‌ها خواهد بود. براین اساس، با N مسئله‌ی بهینه‌سازی مستقل مواجه می‌شویم. در این حالت، یک سیستم N مؤلفه‌یی با J دوره دارای $N * ۴^J$ زمان‌بندی نگهداری و تعمیرات ممکن است. با به‌کارگیری چنین رویکردی، توقف سیستم برای انجام هر فعالیت نگهداری برای هر مؤلفه، منطقی و واقع‌گرایانه نیست. با توجه به هزینه‌های بالای توقف در بسیاری از صنایع، به منظور جلوگیری از توقف‌های متعدد سیستم، ترکیبی از فعالیت‌های نگهداری برای مؤلفه‌های مختلف در دوره‌های یکسان به‌کارگرفته می‌شود. به‌عنوان نمونه، اگر سیستم برای تعویض یک مؤلفه متوقف شود، ممکن است انجام انواع فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات برای دیگر مؤلفه‌ها به منظور جلوگیری از توقف مجدد سیستم منطقی به نظر آید، هرچند که زمان بهینه‌ی انجام نگهداری آن‌ها فرا نرسیده باشد. تحت این سناریو، هزینه‌ی مستقیم توقف سیستم برای هر دوره به شرطی در نظرگرفته می‌شود که

حداقل یکی از فعالیت‌های نگهداری تعریفی برای یک مؤلفه‌در دوره‌ی مد نظر انجام شود. با در نظر گرفتن این هزینه، مسئله‌ی پیش رو واقعی‌تر و البته سخت‌تر جلوه خواهد داد. زیرا باید ترتیب بهینه فعالیت‌ها به طور همزمان برای همه‌ی مؤلفه‌ها تعیین شود. در این حالت ۴^{N*J} جواب ممکن وجود خواهد داشت. این هزینه در واقع همان هزینه‌ی اضافی طی نگهداری پیشگیرانه را دربر می‌گیرد که شامل هزینه‌ی آماده‌سازی متخصصین، هزینه‌ی دمونتاژ موتور، هزینه‌ی انبار کردن و حمل برای عناصری که عمل نگهداری انجام نشده است. اگر نگهداری انجام نشود هزینه‌ی ثابتی هم وجود ندارد.

تاکنون در تمام تحقیقات این نوع هزینه ثابت در نظر گرفته شده است. اما با توقف سیستم برای انجام فعالیت نگهداری روی بعضی از مؤلفه‌ها علاوه بر هزینه‌های دمونتاژ، حمل و انبار و ... مؤلفه‌هایی که هیچ فعالیتی روی آن‌ها انجام نمی‌گیرد، در واقع توقف سیستم و عدم دسترسی سیستم در هرواحد زمان، یک هزینه به ازای هر واحد از زمان به سبب فرصت از دست رفته به مجموعه تحمیل می‌کند.

پس این هزینه به یک هزینه‌ی ثابت و یک هزینه‌ی متغیر شکسته می‌شود:

$$H = h_{FC} + h_{DC}.t \qquad (۱۶)$$

h_{DC}: هزینه‌ی مستقیم توقف سیستم برای اجرای نگهداری به‌ازای هر واحد زمان در دوره jام؛

t: مدت زمان توقف سیستم برای انجام فعالیت‌های نگهداری.

اگر فرض شود که به مقدار X_j واحد زمانی توقف غیرخرابی وجود دارد در این صورت هزینه‌ی H به یک رابطه‌ی دوضابطه‌یی به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ تغییر خواهد یافت:

$$H_j = \begin{cases} h_{FC} + h_{DC}.(t - X_j) & t > X_j \\ h_{FC} & t \le X_j \end{cases} \qquad (۱۷)$$

چنان که پیداست، هزینه‌ی توقف سیستم به دلیل اجرای نگهداری صرفاً به دلیل توقفی که در سیستم برای انجام فعالیت‌های نگهداری ایجاد می‌شود لحاظ می‌شود اما در هر دوره ممکن است مدتی سیستم به دلیل توقفات غیرخرابی و نه به دلیل انجام فعالیت‌های نگهداری متوقف شود. از آن‌جا که واحد نگهداری قادر به کنترل این توقفات نیست، باید از این تهدید به‌عنوان فرصتی برای انجام بعضی از فعالیت‌های نگهداری استفاده کرد. پس در صورت انجام یا عدم انجام فعالیت‌های نگهداری در طی این زمان‌ها، سیستم در دسترس نخواهد بود و انجام فعالیت‌های نگهداری در این زمان‌ها، باعث هزینه‌ی h_{DC} نمی‌شود. با این رویکرد جدید، انجام فعالیت‌های نگهداری در زمان توقفات غیرخرابی، سبب کاهش هزینه‌ی توقف سیستم به دلیل اجرای نگهداری می‌شود.

در طی طول عمر سیستم، تولید به دفعات انجام می‌گیرد که به آن اجرای تولید یا همان ماموریت و وظیفه گفته می‌شود. بعد از هر بار اجرای تولید، سیستم ممکن است متوقف شود و یا این که بدون توقف به کار خود ادامه دهد.

اگر فرض شود هر k دوره یک بار مدتی توقف غیرخرابی وجود داشته باشد (k می‌تواند ۱ تا B باشد) آن‌گاه مجموعه‌ی F برای تفکیک دوره‌هایی که در آن توقف غیرخرابی رخ می‌دهد از دوره‌هایی که توقفات غیرخرابی رخ نمی‌دهد به‌صورت رابطه‌ی ۱۸ تعریف می‌شود $[a]$بیان‌گر جزء صحیح a است:

$$F = \left\{ k.j \middle| j = ۱, ۲, \ldots, \left\lfloor \frac{B}{K} \right\rfloor \right\} \qquad (۱۸)$$

هزینه‌ی توقف سیستم به دلیل اجرای نگهداری شامل سه جمله است که جمله‌ی اول همان هزینه‌ی ثابت است که با انجام تنها یک فعالیت از فعالیت‌های نگهداری لحاظ می‌شود. جمله‌ی دوم مربوط به هزینه‌های متغیر برای دوره‌هایی است که در آن توقف غیرخرابی وجود ندارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این جمله با افزایش مدت‌زمان اجرای فعالیت‌های نگهداری افزایش می‌یابد. جمله‌ی سوم مربوط به هزینه‌ی متغیر برای دوره‌هایی است که در آن‌ها عدم دسترسی غیرخرابی وجود دارد. برای لحاظ کردن توقفات غیرخرابی در مدل و تأثیر آن بر کاهش هزینه‌های اجرای نگهداری، از متغیر f_j استفاده شده است. این متغیر در صورتی که مدت زمان انجام فعالیت‌های نگهداری در دوره j کم‌تر از مدت زمان عدم‌دسترسی غیرخرابی آن دوره باشد صفر و در غیر این صورت یک خواهد بود.

چنان که ملاحظه می‌شود، اگر مدت زمان اجرای فعالیت‌های نگهداری کم‌تر از مدت زمانی باشد که سیستم به دلیل توقفات غیرخرابی در دسترس نیست، انگاه متغیر f_j مقدار صفر به خود می‌گیرد و جمله‌ی سوم تابع H صفر خواهد شد. این بدان معناست که اگر زمان‌بندی به گونه‌یی باشد که در یک دوره، اجرای فعالیت‌های انتخاب شده‌ی نگهداری در همان مدت زمانی که سیستم به‌دلیل غیرخرابی متوقف شده است به اتمام برسد آنگاه نیازی برای توقف بیشتر سیستم و عوامل تولید برای اجرای نگهداری نیست. هرقدر مدت زمان اجرای فعالیت‌های نگهداری از مدت زمان توقف غیرخرابی بیشتر باشد، به همان میزان هزینه‌ی متغیر به سیستم تحمیل می‌شود.

$$f_j = \begin{cases} ۰ & if \sum_{i=۱}^{N} [ms_{i,j}.TMS + mr_{i,j}.TMR + rp_{i,j}.TRP] \le X_j \\ ۱ & otherwise \end{cases}$$
$$\text{For } j \in F \qquad (۱۹)$$

۳.۲.۵. هزینه‌ی مستقیم شکست ناگهانی سیستم

هزینه‌ی خرابی بالقوه برای لحاظ کردن امکان ضعیف این که سیستم در طی اجرا خراب شود معرفی شده است. یک بار که سیستم خراب شود، باعث یک ضرر می‌شود (فرض می‌شود این ضرر برابر مقدار C_f باشد). بنابراین هزینه‌ی خرابی بالقوه به‌وسیله‌ی رابطه‌ی ۲۰ محاسبه می‌شود:

$$\max\left(۱ - R_{sys,j}(t)\right).C_f ; j = ۱, ۲, \ldots, B, ۰ \le t \le \Delta t \qquad (۲۰)$$

چون قابلیت اطمینان به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابد، با توجه به t در هر فاصله‌ی زمانی، معادله‌ی ۲۰ را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی ۲۱ نوشت:

$$\max\left(۱ - R_{sys,j}(\Delta t)\right).C_f \qquad ; j = ۱, ۲, \ldots, B \qquad (۲۱)$$

۴.۲.۵. هزینه‌ی نگهداری اصلاحی سیستم

این هزینه به سبب انجام نگهداری اصلاحی است که بعد از خرابی یک مؤلفه‌و برای برگرداندن سیستم به عملیات انجام می‌شود. در سیستم سری، احتمال توقف سیستم در هر دوره برابر با احتمال شکست حداقل یکی از مؤلفه‌ها در همان دوره است. احتمال شکست یکی از مؤلفه‌ها از رابطه‌ی ۲۲ به دست می‌آید:

$$\int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t)\,dt \;\; for\; i = ۱, ۲, \ldots, N; j = ۱, ۲, \ldots, B \qquad (۲۲)$$

تعداد دفعات توقف ناگهانی سیستم در دوره‌ی j نیز از رابطه‌ی ۲۳ قابل محاسبه است:

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i \left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i (X_{i,j})^{\beta_i} \qquad (۲۳)$$

هزینه‌ی نگهداری اصلاحی سیستم از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود:

$$(C_b.t_{b,m}) \sum_{j=1}^{B} \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \left(\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - (X_{i,j})^{\beta_i} \right) \qquad (۲۴)$$

۳.۵. قابلیت اطمینان پویا تحت نگهداری پیشگیرانه

فرض کنید سیستم برای B دوره به کار گرفته شود، قابلیت اطمینان زیرسیستم iام در طی دوره‌ی jام را می‌توان به‌وسیله‌ی در نظرگرفتن تأثیر عمر مؤثر تجمعی X_{ij} روی امکان این که سیستم می‌تواند یک زمان اضافه (t) هم سالم بماند توضیح داد. با استفاده از قابلیت اطمینان شرطی، طبق رابطه‌ی ۲۵ تعریف می‌شود:

$$\tilde{R}_{i,J}(t) = R_i\left(t|X_{i,j}\right) \qquad ۰ \le t \le \Delta t \qquad (۲۵)$$

به منظور محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم سری، در ابتدا باید قابلیت اطمینان مؤلفه‌ی iام در دوره‌ی jام را طبق رابطه‌ی ۲۶ محاسبه کرد و سپس، طبق رابطه‌ی ۲۷ آن را به منظور محاسبه‌ی قابلیت اطمینان سیستم در طول افق برنامه‌ریزی تعمیم داد.

$$R_{i,j} = e^{-\int_{X_{i,j}}^{X'_{i,j}} v_i(t)dt} = e^{-\left[\lambda_i\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i\left(X_{i,j}\right)^{\beta_i}\right]} \qquad (۲۶)$$
$$for\ i = ۱, ۲, \ldots, N\ ; j = ۱, ۲, \ldots, B$$

$$R_{SYS} = \prod_{i=1}^{N} \prod_{j=1}^{B} e^{-\left[\lambda_i\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i\left(X_{i,j}\right)^{\beta_i}\right]} \qquad (۲۷)$$

و نیز قابلیت اطمینان سیستم در هر دوره از روابط ۲۸ و ۲۹ محاسبه می‌شود:

$$R_{sys,j}(t) = \prod_{i=1}^{N} \tilde{R}\mathrm{i,j}(t) \quad for\ ۰ \le t \le \Delta t \qquad (۲۸)$$

$$R_{SYS,j} = \prod_{i=1}^{N} e^{-\left[\lambda_i\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i\left(X_{i,j}\right)^{\beta_i}\right]}; j = ۱, ۲, \ldots, B \qquad (۲۹)$$

برای برآورده شدن قابلیت اطمینان مورد نظر، رابطه‌ی ۳۰ باید برقرار باشد:

$$\min\left(\prod_{i=1}^{N} e^{-\left[\lambda_i\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i\left(X_{i,j}\right)^{\beta_i}\right]}\right) > R_{req}; j = ۱, ۲, \ldots, B \qquad (۳۰)$$

۴.۵. تابع هدف

در نهایت مدل با تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی کل به‌صورت رابطه‌ی ۳۱ ارائه می‌شود که در آن، جمله‌ی اول بیان‌گر هزینه‌ی ثابت توقف سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه، جمله‌ی دوم هزینه‌ی متغیر توقف سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در دوره‌هایی که توقف غیر خرابی وجود ندارد، جمله‌ی سوم هزینه‌ی متغیر توقف سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه در دوره‌هایی که توقف غیرخرابی وجود دارد، جمله‌ی چهارم هزینه‌ی اجرای فعالیت‌های نگهداری پیشگیرانه، جمله‌ی پنجم هزینه‌ی خرابی بالقوه و جمله‌ی ششم بیان‌گر هزینه‌ی مستقیم شکست ناگهانی سیستم است.

$$\begin{aligned}
&Min\ Total\ Cost = \\
&\sum_{j=1}^{B} h_{FC}\left(۱ - \prod_{i=1}^{N}\left(۱ - \left(ms_{i,j} + mr_{i,j} + r_{i,j}\right)\right)\right) \\
&+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \notin F}}^{B} h_{DC}.\left[\sum_{i=1}^{N}\left[ms_{i,j}.TMS_i + mr_{i,j}.TMR_i + rp_{i,j}.TRP_i\right]\right] \\
&+ \sum_{j \in F} f_j.h_{DC} \\
&\left[\left[\sum_{i=1}^{N}\left[ms_{i,j}.TMS_i + mr_{i,j}.TMR_i + rp_{i,j}.TRP_i\right]\right] - X_j\right] \\
&+ \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{B}\left(MS.ms_{i,j} + MR.mr_{i,j} + R.r_{i,j}\right) \\
&+ \sum_{j=1}^{B} Max\left(۱ - R_{sys,j}\left(\Delta t\right)\right)C_f \\
&+ \left(C_b.t_{b,m}\right)\sum_{j=1}^{B}\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\left(X'_{i,j}\right)^{\beta_i} - \lambda_i\left(X_{i,j}\right)^{\beta_i}
\end{aligned}$$

۶. روش حل

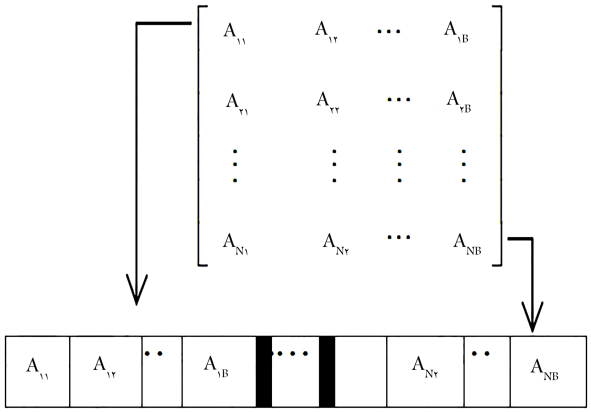
مسئله‌ی زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه تعداد زیادی از پارامترها را شامل می‌شود که با یکدیگر تعاملات قوی و غیرخطی دارند. در حقیقت وقتی سیستم تعداد زیادی مؤلفه داشته باشد یا افق برنامه‌ریزی بلند باشد مسئله بسیار پیچیده می‌شود. برای مسائل با اندازه‌ی واقعی و با تعداد متغیرهای زیاد، روش‌های حل سنتی از قبیل شاخه و کران کارایی چندانی ندارند، زیرا زمان مورد نیاز آن‌ها برای حل موجه نیست.[۲۷]

ثابت شده است که مسئله‌ی زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه یک مسئله‌ی بهینه‌سازی ترکیبی Np-hard است.[۲۸] با توجه به زمان زیاد مورد نیاز برای یافتن جواب بهینه، در مسائل نگهداری و تعویض پیشگیرانه سعی در یافتن یک جواب نزدیک به بهینه به‌منظورکاهش زمان محاسبات تا حد ممکن است. بهترین استراتژی، یافتن یک جواب نزدیک به بهینه ولی سریع است. اگرچه تکنیک‌های فراابتکاری لزوماً جواب بهینه‌ی عمومی را تضمین نمی‌کنند هیچ محدودیتی برای مسائل با اندازه‌ی بالا و نوع ساخت مسئله ندارند و می‌توانند جواب‌هایی مناسب در زمان حل موجه ارائه دهند.

از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی فعالیت‌های نگهداری و تعویض ارائه شده استفاده شده است. الگوریتم، داده‌هایی مثل تعداد دوره، تعداد مؤلفه، مدت توقفات غیرخرابی در هر دوره، درصد وابستگی بین مؤلفه‌ها، پارامترهای هزینه و زمان هر مؤلفه‌را به‌عنوان ورودی می‌گیرد و یک زمان‌بندی بهینه یا نزدیک به بهینه از فعالیت‌های PM هر مؤلفه‌را در دوره‌های مختلف ارائه می‌دهد.

۱.۶. تطابق مدل و معرفی افراد برای الگوریتم ژنتیک

برای توضیح مدل و برای برنامه‌ریزی الگوریتم ژنتیک، چند اصلاح برای راحت کردن اجرا انجام شده است. متغیر عدد صحیح مثل A_{ij} نشان‌گر عملیات نگهداری است که با توجه به مقادیر rp_{ij}، mr_{ij}، ms_{ij} مقادیر ۰، ۱، ۲ و ۳ را به خود می‌گیرد. اگر روی زیرسیستم iام بعد از دوره‌ی j ام فعالیت MS انجام گیرد آنگاه A_{ij} برابر ۱، اگر روی زیرسیستم iام بعد از دوره‌ی jام فعالیت MR انجام گیرد آنگاه A_{ij}



شکل ۳. فرایند تبدیل متغیر A به رشته‌های صحیح کد شده.

مقدار ۲ و اگر هیچ فعالیتی انجام نگیرد مقدار صفر را به خود می‌گیرد.پس A_{ij} متغیر تصمیم معادل است که باید در برنامه الگوریتم ژنتیک مدل شود. تبدیل A_{ij} در الگوریتم به این شکل انجام می‌شود که هر سطر ماتریس A را خارج کرده و آن‌ها را پشت سر هم می‌نویسیم مانند شکل ۳. هر A_{ij} یک مکان را در کروموزوم به‌عنوان ژن به خود اختصاص می‌دهد. طول کروموزوم $M \times N$ است. هر بیت را می‌توان به جای روش سنتی صفر و ۱، با یک عدد صحیح تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰، ۱، ۲ و ۳ تخصیص داد. پس این روش ارائه‌ی تکی، یک تفاوت کوچک در جهش ایجاد می‌کند که مکان انتخاب شده را می‌توان با یک عدد صحیح تولید شده تصادفی بین [۰،۳] تغییر داد.

۷. مطالعه موردی

برای تحلیل کارایی و دقت الگوریتم‌های فرابتکاری و مقایسه‌ی آن‌ها با روش‌های دقیق در مسائل زمان‌بندی تعویض و نگهداری پیشگیرانه، مدل توسعه داده شده در این زمینه در نرم‌افزار GAMS و با حل‌کننده‌ی Baron و همچنین با الگوریتم فرابتکاری ژنتیک در نرم‌افزار Visual Studioبه زبان سی‌شارپ حل شده است.

با حل یک مثال عددی برای یک سیستم چهارمؤلفه‌یی و ترسیم نمودارهایی اهمیت توقفات غیرخرابی مورد بررسی قرار گرفته است؛ جداول ۱ و ۲ پارامترهای مسئله‌را نشان می‌دهند.

اگر طبق مثال عددی، k برابر ۴ باشد و در دوره‌های چهارم، هشتم، دوازدهم و شانزدهم به ترتیب ۷۰، ۴۰، ۱۵۰ و ۳۰ واحد زمانی توقف غیرخرابی وجود داشته باشد در آن‌صورت زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نگهداری در جدول ۳ قابل مشاهده است. واضح است که در برنامه‌ریزی از تمام توقفات غیرخرابی استفاده کامل شده و فعالیت‌های نگهداری در دوره‌هایی که توقف غیرخرابی وجود دارد انجام شده است.

مقایسه‌ی جدول ۳ و جدول ۴ نشان می‌دهد تعداد دوره‌هایی که در آن حداقل یک فعالیت انجام شده است ـ در حالتی که توقفات غیرخرابی لحاظ شده است ـ نسبت به حالت عدم استفاده از توقفات غیر خرابی از هفت دوره به ۴ دوره و نیز هزینه‌ی کلی زمان‌بندی از ۲۹۱۰۹۱٫۱ به ۲۶۰۹۶٫۸ کاهش یافته است. در هر دوره انجام حداقل یک فعالیت و توزیع فعالیت‌ها سبب تحمیل هزینه‌ی ثابت می‌شود. بنابراین فعالیت‌های مختلف برای مؤلفه‌ها در حالت در نظرگرفتن توقفات خرابی تا حد امکان در دوره‌های محدود صورت گرفته است.

در دوره‌های ابتدایی به دلیل نو بودن مؤلفه‌ها، بدون انجام هیچ‌گونه فعالیت نگهداری، قابلیت اطمینان مورد نظر برآورده خواهد شد و نیازی به صرف هزینه‌ی نگهداری نیست. با افزایش زمان و فرسوده‌تر شدن مؤلفه‌ها، فعالیت‌های سرویس و تعمیر پیشگیرانه تا حدودی کارایی اقتصادی خود را از دست داده و نیاز به تعویض احساس می‌شود. چنان که مشاهده می‌شود در دوره‌ی دهم به دلیل کم شدن تأثیر فعالیت تعویض، پیاده‌سازی اساسی صورت گرفته و هم‌زمان سه مؤلفه‌تعویض شده‌اند. با توجه به نمودار ۱، می‌توان یک روند کاهشی در قابلیت اطمینان را مشاهده

جدول ۱. پارامترهای هر مؤلفه مثال عددی.

مؤلفه پارامتر	۱	۲	۳	۴
MS_i	۲۵	۲۰	۳۰	۲۴
MR_i	۱۰۰	۱۱۰	۱۴۵	۱۰۰
RP_i	۵۲۰	۷۰۰	۶۰۰	۶۵۰
TMS_i	۲۵	۲۵	۲۵	۲۵
TMR_i	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
TR_i	۷۰	۷۰	۷۰	۷۰
λ_i	۰٫۰۰۲۲	۰٫۰۰۳۵	۰٫۰۰۳۸	۰٫۰۰۳۳
β_i	۲٫۲	۲٫۰۵	۲٫۱	۲٫۲
$m_{i,1}$	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۵
$m_{i,2}$	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲

جدول ۲. پارامترهای هر مؤلفه مثال عددی.

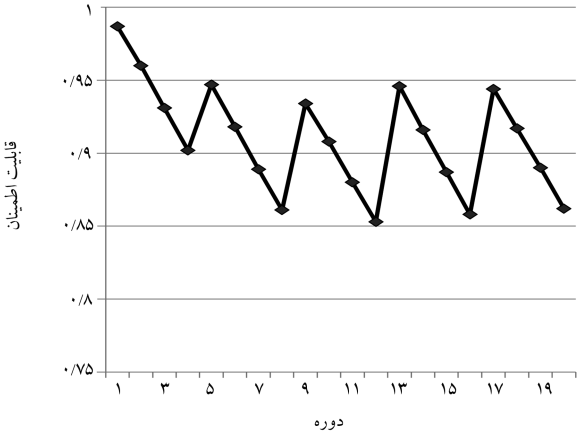
پارامتر	B	h_{DC}	h_{FC}	C_b	$t_{b,m}$	C_f	R_{req}
مقدار	۲۰	۰٫۵	۵۰۰	۳۰	۱۰۰	۵۰۰۰	۰٫۸۵

جدول ۳. زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نگهداری با در نظرگرفتن توقفات غیر خرابی.

مؤلفه دوره	۱	۲	۳	۴
۱	-	-	-	-
۲	-	-	-	-
۳	-	-	-	-
۴	MS	MR	RP	MS
۵	-	-	-	-
۶	-	-	-	-
۷	-	-	-	-
۸	RP	MS	-	RP
۹	-	-	-	-
۱۰	-	-	-	-
۱۱	-	-	-	-
۱۲	-	RP	RP	MR
۱۳	-	-	-	-
۱۴	-	-	-	-
۱۵	-	-	-	-
۱۶	RP	-	MR	RP
۱۷	-	-	-	-
۱۸	-	-	-	-
۱۹	-	-	-	-
۲۰	-	-	-	-

جدول ۴. زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های نگهداری بدون در نظر گرفتن توقفات غیر خرابی.

مؤلفه دوره	۱	۲	۳	۴
۱	-	-	-	-
۲	-	-	-	-
۳	-	-	-	-
۴	-	-	-	-
۵	MR	MR		MR
۶	-	-	-	-
۷	-	-	RP	MR
۸	-	-	-	-
۹	-	-	-	-
۱۰	RP	RP	-	RP
۱۱	-	-	-	-
۱۲	-	-	-	-
۱۳	-	-	-	-
۱۴	-	-	RP	-
۱۵	MR	-	-	-
۱۶	-	MR	-	RP
۱۷	MR	-	-	-
۱۸	-	-	-	-
۱۹	-	-	-	-
۲۰	-	-	-	-

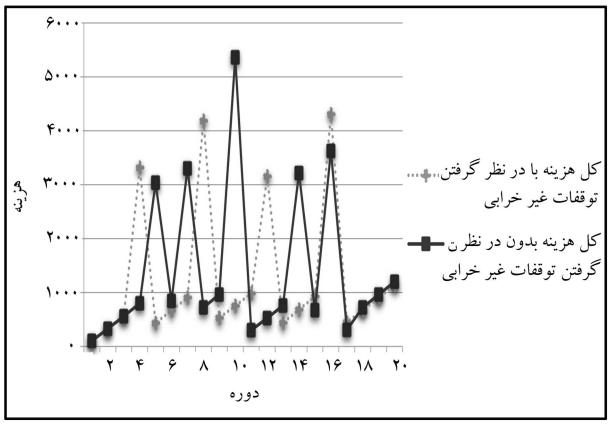


نمودار ۱. قابلیت اطمینان سیستم در پایان هر دوره.

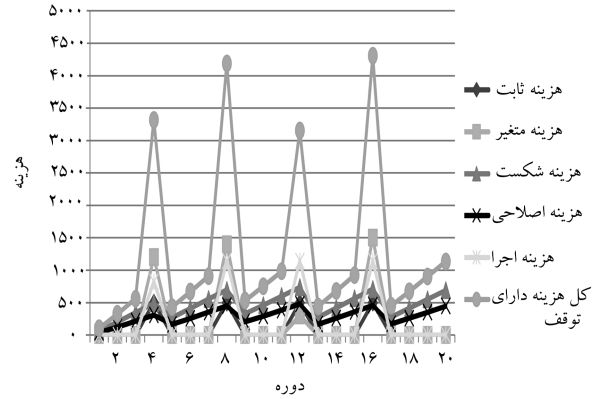
کرد که بیان‌گر یک الگوی افزایشی در نرخ رخداد شکست سیستم است. نقاطی که در آن‌ها فعالیت نگهداری انجام شده است سبب کاهش عمر مؤثر مؤلفه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان شده است.

این مدل برای تعیین یک برنامه از فعالیت‌ها شامل نگهداری یا تعویض برای هر مؤلفه‌ی سیستم طی افق برنامه‌ریزی توسعه داده شده است، با این هدف که هزینه‌ها کمینه‌سازی شود طوری که قابلیت اطمینان مورد نیاز سیستم برآورده شود.

برای انجام این تحلیل، یک آزمایش طراحی و اجرا شده است. مدل بهینه‌سازی با سه مجموعه از داده‌ها برای سیستم سری با ۱، ۲ و ۳ مؤلفه‌طی ۲، ۸ و ۲۰ دوره حل شده است. نتایج این آزمایش در جدول ۵ آورده شده‌است. نتایج شامل مقادیر تابع هدف،



نمودار ۲. مقایسه بین هزینه‌های نگهداری و تعمیرات پایان هر دوره در حالت در نظرگرفتن و عدم در نظرگرفتن توقفات غیر خرابی.



نمودار ۳. هزینه‌های نگهداری و تعمیرات سیستم در پایان هر دوره با در نظرگرفتن توقفات غیر خرابی.

اختلاف تابع هدف به دست آمده به وسیله‌ی الگوریتم‌های فرابتکاری در مقایسه با مقدار به دست آمده به‌وسیله‌ی الگوریتم دقیق، زمان محاسباتی و نیز انحراف از میانگین جواب‌های الگوریتم ژنتیک هستند. انحراف معیار الگوریتم بسیار کم است و هرگز فراتر از ۳/۵ درصد نمی‌رود که این بیان‌گر توانایی الگوریتم و قابل اتکا بودن آن است.

چنان که مشاهده می‌شود، در سیستم تک‌مؤلفه، فاصله‌ی توابع هدف جواب‌های به دست آمده از GA نسبت به روش دقیق حول دو درصد تغییر می‌کند. این فاصله اغلب با افزایش اندازه‌ی مسئله ثابت است. می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم‌های فرابتکاری برای مسائل با اندازه بزرگ به خوبی عمل می‌کنند.

طبق نمودار ۲، با در نظرگرفتن توقفات غیرخرابی، تعداد دوره‌هایی که در آن حداقل یک فعالیت انجام شده است نسبت به حالت عدم استفاده از توقفات غیرخرابی از هفت دوره به چهار دوره کاهش یافته است (که باعث کاهش هزینه‌ی ثابت خواهد شد) و نیز از توقف سیستم طی دوره‌های مختلف برای انجام فعالیت‌های نگهداری جلوگیری شده و دیگر نیازی به تحمیل هزینه‌ی زیاد در دوره دهم به واسطه‌ی پیاده‌سازی کلی نیست.

بنابراین هزینه‌ی کلی زمان‌بندی حدوداً ۱۰ درصد کاهش یافته است. هزینه‌های مختلف زمان‌بندی نگهداری پیشگیرانه‌ی سیستم در نمودار ۳ قابل مشاهده است. بعد از دوره‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ با انجام فعالیت‌ها نگهداری، به دلیل افزایش قابلیت اطمینان، هزینه‌ی شکست کاهش می‌یابد.

جدول ۵. مقایسه‌روش دقیق و الگوریتم فرابتکاری ژنتیک.

زمان محاسبه (ثانیه)	درصد انحراف از معیار جواب‌های الگوریتم GA	تفاوت بین جواب دقیق و جواب حاصل از میانگین الگوریتم GA (درصد)	تابع هدف بهترین جواب	میانگین مقدار تابع هدف در ۱۰ بار اجرا	روش حل	حداقل قابلیت اطمینان مورد نیاز سیستم در هر دوره	تعداد دوره	تعداد مؤلفه
۱۲	۰	۰	۸۰٫۷	۸۰٫۷	GA		۲	
۱			۸۰٫۷	۸۰٫۷	EXACT			
۴۲	۰	۰	۲۱۸۸٫۱۸۲	۲۱۸۸٫۱۸۲	GA	۰٫۹۵	۸	۱
۱۷			۲۱۸۸٫۱۸۲	۲۱۸۸٫۱۸۲	EXACT			
۱۶۴	(۳٫۵ درصد)	۲٫۳	۶۸۵۹٫۳۲	۷۰۲۱٫۲	GA		۲۰	
۸۰۵۹۴			۶۸۵۹٫۳۲	۶۸۵۹٫۳۲	EXACT			
۸	۰	۰	۱۹۱٫۹۴۵	۱۹۱٫۹۴۵	GA		۲	
۰			۱۹۱٫۹۴۵	۱۹۱٫۹۴۵	EXACT			
۱۰۸	(۳٫۰۳ درصد)	۴٫۰۶	۴۷۴۱٫۶۷	۴۹۳۴٫۳	GA	۰٫۹۵	۸	۲
۲۱۴۱۸			۴۷۴۱٫۶۷	۴۷۴۱٫۶۷	EXACT			
۲۴۵	(۱٫۰۱ درصد)	-	۱۷۲۳۷٫۹	۱۷۴۴۹٫۲	GA		۲۰	
بیش از ۴۰۰۰۰			-	-	EXACT			
۱۰	۰	۰	۳۱۶٫۲۵۳	۳۱۶٫۲۵۳	GA		۲	
۱			۳۱۶٫۲۵۳	۳۱۶٫۲۵۳	EXACT			
۱۲۴	(۱٫۷۴ درصد)		۱۰۰۷۱٫۸	۱۰۴۳۶	GA	۰٫۹۵	۸	۳
بیش از ۴۰۰۰۰			-	-	EXACT			
بیش از ۴۰۰۰۰	(۲٫۱۶ درصد)	-	۳۱۳۰۱٫۷	۳۲۱۴۴٫۴	GA		۲۰	
			-	-	EXACT			

زمان محاسباتی (CPU time) روش‌ها نیز در جدول ۵ مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که این زمان برای روش‌های دقیق با افزایش اندازه مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد و برای هر اندازه مسئله، زمان محاسباتی الگوریتم‌های فرابتکاری همیشه کم‌تر از ۸ دقیقه است که برای مسائل با اندازه بزرگ بسیار مناسب است.

۸. نتیجه‌گیری

این نوشتار شامل زمان‌بندی فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه سیستم‌های چندمؤلفه‌یی است. با توجه به نرخ افزایشی رخداد شکست هر مؤلفه، مفاهیم کاهش سن و عوامل بهبود به کار گرفته شد و یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح آمیخته غیرخطی با لحاظ کردن توقفات غیرخرابی در مدل و با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی سیستم تحت محدودیت قابلیت اطمینان مورد نیاز در یک افق برنامه‌ریزی محدود ارائه شد. در اغلب مطالعات انجام شده فرض بر این بوده است که سیستم تا وقوع یک خرابی بدون توقف کار می‌کند در حالی که در دنیای واقعی توقفات غیرخرابی به دلایلی نظیر: نوع و پیوستگی کار، آموزش پرسنل، صرف نهار، آماده‌سازی، تولید نمونه‌های اولیه و آزمون، تخلیه‌ی نهایی و ... رخ می‌دهد که در این نوشتار به‌عنوان مهم‌ترین نوآوری از این توقفات به‌عنوان فرصتی برای انجام بعضی از فعالیت‌های نگهداری استفاده شد و نیز به‌عنوان نوآوری‌های دیگر، علاوه بر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، در مواقع شکست ناگهانی هر مؤلفه، نگهداری و تعمیرات اصلاحی نیز لحاظ شد و همچنین هزینه‌ی توقف کامل سیستم برای اجرای فعالیت‌های نگهداری به‌صورت وابسته به مدت زمان اجرا در نظر گرفته شد.

با توجه به غیرخطی بودن مدل ارائه شده و به‌منظور حل مسائل در ابعاد بزرگ، روش فرابتکاری ژنتیک ارائه شد. نتایج محاسباتی برکارا بودن الگوریتم و نیزکاهش

چشمگیر هزینه‌ها به سبب در نظر گرفتن توقفات غیرخرابی دلالت داشت.

برای ادامه‌ی کار در این حوزه می‌توان به‌صورت هم‌زمان از دیگر سیاست‌های نگهداری همچون نگهداری مبتنی بر شرایط و نگهداری فرصت طلبانه برای استفاده از مزایای این سیاست‌ها بهره برد. همچنین پیاده‌سازی مدل برای سیستم‌هایی با ساختار پیچیده و با در نظر گرفتن اهدافی نظیر بیشینه‌سازی دسترسی‌پذیری برای بررسی تأثیرشان بر مدل پیشنهاد می‌شود.

پانوشت‌ها

1. operational cost
2. requirement reliability
3. break down
4. bad-as-old
5. Overhaul
6. opportunistic maintenance
7. maintenance service
8. maintenance repair (MR)
9. Replacement (RP)

منابع (References)

1. Chen, T., Li, J., Jin, P. and et al. "Reusable rocket engine preventive maintenance scheduling using genetic algorithm", *Reliability Engineering & System Safety*, **114**, pp. 52-60 (2014).
2. Liao, W., Pan, E. and Xi, L. "Preventive maintenance scheduling for repairable system with deterioration", *Journal of Intelligent Manufacturing*, **21**(6), pp. 875-884 (2010).
3. Kamran, S. Moghaddam. and John, S. Usher. "Sensitivity analysis and comparison of algorithms in preventive maintenance and replacement scheduling optimization models", *Computers & Industrial Engineering*, **61**, pp. 64-75 (2011).
4. Hu, J. and Zhang, L. "Risk based opportunistic maintenance model for complex mechanical systems", *Expert Syst Appl*, **41**(6), pp. 3105-3115 (2014).
5. Jardine, A.K., Lin, D. and Banjevic, D. "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", *Mech Syst Signal Process*, **20**(7), pp. 1483-1510 (2006).
6. Mo, H., Sansavini, G. and Xie, M. "Performance-based maintenance of gas turbines for reliable control of degraded power systems", *Mech Syst Signal Process*, **103**, pp. 398-412 (2019).
7. Moghaddam, K.S. "Multi-objective preventive maintenance and replacement scheduling in a manufacturing system using goal programming", *International Journal of Production Economics*, **146**(2), pp. 704-716 (2013).
8. Duan, C., Deng, C. and Wang, B. "Multi-phase sequential preventive maintenance scheduling for deteriorating repairable systems", *J Intell Manuf*, **30**(4), pp. 1-15 (2018).
9. Barlow, R. and Hunter, L. "Optimum preventive maintenance policies", *Operations Research*, **8**, pp. 90-100 (1960).
10. Cassady, C. R., and Kutanoglu, E. "Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine", *Reliability, IEEE Transactions On*, **54**(2), pp. 304-309 (2005).
11. Cheung, K.L. and Hausman, W.H. "Joint determination of preventive maintenance and safety stocks in an unreliable production environment", *Naval Research Logistics (NRL)*, **44**(3), pp. 257-272 (1997).
12. Wu, S. "Assessing maintenance contracts when preventive maintenance is outsourced", *Reliability Engineering & System Safety*, **98**(1), pp. 66-72 (2012).
13. Hu, J., Zhang, L. and Liang, W. "Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model", *Process Safety and Environmental Protection*, **90**(5), 376-388.
14. Bris, R., Châtelet, E. and Yalaoui, F. "New method to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems", *Reliability Engineering & System Safety*, **82**(3), pp. 247-255 (2003).
15. Samrout, M., Yalaoui, F., Châtelet, E. and et al. "New methods to minimize the preventive maintenance cost of series-parallel systems using ant colony optimization", *Reliability Engineering & system safety*, **89**(3), pp. 346-354 (2005).
16. Zhou, X., Xi, L. and Lee, J. "A dynamic opportunistic maintenance policy for continuously monitored systems", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, **12**(3), pp. 294-305 (2006).
17. Garg, H., Rani, M. and Sharma, S.P. "Preventive maintenance scheduling of the pulping unit in a paper plant", *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, **30**(2), pp. 397-414 (2013).
18. Nourelfath, M. and Ait-Kadi, D. "Optimization of series-parallel multi-state systems under maintenance policies", *Reliability Engineering & System Safety*, **92**(12), pp. 1620-1626 (2007).
19. Shalaby, M.A., Gomaa, A.H. and Mohib, A.M. "A genetic algorithm for preventive maintenance scheduling in a multiunit multistate system", *Journal of Engineering and Applied Science*, **51**(4), pp. 795-811 (2004).
20. Keizer, M.C.O., Flapper, S.D.P. and Teunter, R.H. "Condition-based maintenance policies for systems with multiple dependent components: a review", *Eur J Oper Res*, **261**(2), pp. 405-420 (2018).
21. Ding, F. and Tian, Z. "Opportunistic maintenance optimization for wind turbine systems considering imperfect maintenance actions", *Int J Reliab Qual Saf Eng*, **18**(05), pp. 463-481 (2011).

22. Nakagawa, T. "Periodic and sequential preventive maintenance policies", *J Appl Probab*, **23**(02), pp. 536-542 (1986).

23. Nakagawa, T. "Sequential imperfect preventive maintenance policies", *IEEE Trans Reliab*, **37**(3), pp. 295-298 (1988).

24. Lie, C.H. and Chun, Y.H. "An algorithm for preventive maintenance policy", *IEEE Trans Reliab*, **35**(1), pp. 71-75 (1986).

25. Moghaddam, K.S. and Usher, J.S. "A new multi-objective optimization model for preventive maintenance and replacement scheduling of multi-component systems", *Engineering Optimization*, **43**(7), pp. 701-719 (2011).

26. Maggard, B. and Rhyne, D. "Total productive maintenance: a timely integration of production and maintenance", *Production and Inventory Management Journal*, **33**, Fourth Quarter, pp. 6-10 (1992).

27. Doostparast, M., Kolahan, F. and Doostparast, M. "A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems", *Reliability Engineering & System Safety*, **126**, pp. 98-106 (2014).

28. Mollahassani-Pour, M., Abdollahi, A. and Rashidinejad, M. "Application of a novel cost reduction index to preventive maintenance scheduling", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **56**, pp. 235-240 (2014).